

強誘電トポロジカル絶縁体における物性開拓

吉見 龍太郎*

Exploration of Physical Properties in Ferroelectric Topological Insulator

Ryutaro YOSHIMI*

This research explores the synergetic effects of ferroelectricity and topology in (Sn, Pb, In)Te thin films grown by molecular beam epitaxy. By tuning the composition near the topological phase transition point, we investigated the evolution of electronic states through non-reciprocal transport measurements, which are highly sensitive to broken inversion symmetry. We observed a prominent anomaly in both longitudinal resistance and carrier density around 20–30 K, indicating a significant modification of the electronic structure. Second-harmonic transport measurements revealed a clear linear nonreciprocal magnetoresistance above 20 K, consistent with the out-of-plane ferroelectric polarization in these films. Notably, the non-reciprocal signal significantly decreased below 10 K. This suppression might be attributed to the emergence of topological Dirac surface states, which potentially alters the contribution of the polar bulk region during the phase transition. These findings demonstrate that nonreciprocal transport is a powerful probe for investigating the coupling between structural symmetry breaking and topological invariants. This study provides critical insights into the realization of electrically controllable topological quantum states, offering a potential platform for next-generation spintronic and low-power functional devices.

1. 背景・目的

近年の物質科学ではトポロジー（幾何学）や対称性といった量子力学的概念の再構築によって発見されたトポロジカル量子物質という概念が注目されている。これらの物質では、結晶内部は絶縁体である一方で、表面にディラック状態と呼ばれる特殊な金属状態が現れる。ディラック状態は表面だけに電気が流れる二次元電子状態であり、また電子スピンの向きが運動量の向きと直交に固定されているため、低次元物性やスピントロニクスという観点で精力的に研究が行われてきた。トポロジカル絶縁体の基礎物性はこの10年でかなり研究が進んできたが、一方でディラック状態のもたらす機能的物性という観点では研究の余地が多い。

本研究では強誘電性とトポロジカル絶縁体状態が協奏的に実現していると予想される(Sn,Pb)Te薄膜に着目する。この物質はSnTeとPbTeの混晶組成である。SnTeは価電子帯と伝導帯がバンド反転したトポロジカル結晶絶縁体と呼ばれる物質で、結晶の鏡面対称性によって守られた表面状態を有する⁽¹⁾。一方で、PbTeはバンド絶縁体でありバンド反転はしていない。Sn-Pbの組成比に応じてバンド構造を連続的に変化し、本実験で注目している混晶組成(Pb濃度約10%)ではバンドギャップはほとんど閉じている。加えて、強誘電性に由来した構造不安定性を有しており、バンドの縮退度が変化することでトポロジカル相転移する。以上のことは電気輸送特性の組成依存性⁽²⁾や、光学フォノンのソフト化⁽³⁾、量子ホール効果における縮退度の解析⁽⁴⁾など複数のプローブから明らかになっており、強誘電性とトポロジーの相関を明らかにする系として興味深い物質系である。特に、強誘電性は電場によって制御可能であるため、表面ディラック状態の発現・消滅や、スピン偏極方向の変更、といった制御が可能になると期待される。その解明の一端として、本研究では強誘電性に起因した(Sn,Pb)Teにおける特徴的な物性の解明を試みる。特に、電気抵抗が電流の方位に依存して変化する非相反電気伝導特性を測定した。

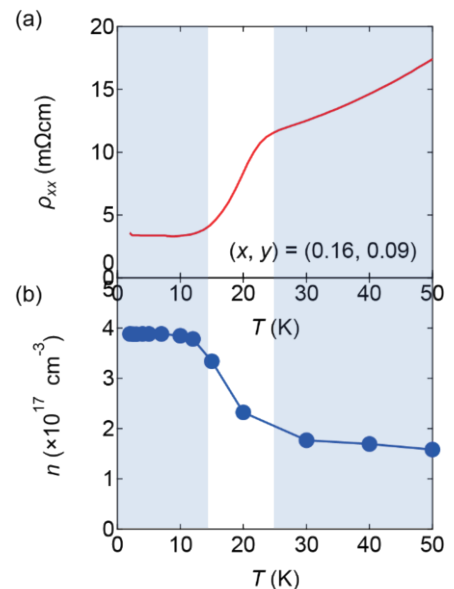


図1 (Sn,Pb,In)Te 薄膜における抵抗と電子濃度の温度依存性。

2026年3月1日 受理

* 豊田理研スカラー

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻

2. 実験

分子線エピタキシー法を用いて InP(111)A 基板上に膜厚 40 nm の (Sn, Pb, In)Te (Pb 16% に加えて、キャリア制御のために In を 9% ドープしている) 薄膜をエピタキシャル成長させた。この薄膜を、UV フォトリソグラフィーを用いて幅 $200 \mu\text{m}$ 、電極間長さ $200 \mu\text{m}$ のホールバー形状に加工し、電子線蒸着法により Ti/Au 電極を蒸着した。電気抵抗の温度依存性を 4 端子法によって測定したところ、図 1(a) のように 20–30 K 付近で抵抗値が急激に減少する温度依存性を示した。また、ホール効果によって試料内の電子濃度を見積もるとの図 1(b) に示すような温度依存性となり、20 K 付近で二倍近く上昇した。このような温度依存性は (Sn, Pb, In)Te の当該組成周辺で特徴的に観測される振る舞いである。大きな抵抗変化とキャリア数の変化は電子構造の変化を示唆しており、二次元的な量子効果である量子ホール効果がこれよりも低温で観測されることから、この温度変化が表面状態の出現を伴うトポロジカル相転移と関連することが考えられる。

続いて、電気伝導の二次高調波測定によって非相反電気伝導特性を調べた。図 2 のように、ホールバーに周波数 ω の交流電流を印加し、ロックイン測定によって周波数 2ω の信号を検波することで二倍の周波数に応答する電気抵抗を測定した。強誘電性が面直方向 (z 方向と定義する) に存在する場合、非相反磁気抵抗は電流印加方向 (x 方向) とその垂直 (y 方向) に磁場を印加することで出現する。

図 3 に温度 $T = 2, 10, 20, 30, 40, 50 \text{ K}$ における最大磁場 9 T までにおける非相反抵抗 $R_{xx}^{2\omega}$ の磁場依存性を示す。印加電流は 100 nA、周波数は 7 Hz を用いた。20 K よりも高温では図から明らかなように磁場に対して線形に上昇する非相反磁気抵抗を観測した。このことは薄膜面直方向に誘電分極を有するという他の実験結果とも符合する。一方で、非相反磁気抵抗信号は 10 K 以下で大きく減少した。この結果を説明する最も単純な物理として強誘電性の消失が考えられるが、通常強誘電性のような対称性の破れを伴う強制的秩序は低温で発達するため考えにくい。一方で、表面状態の出現によってバルク (薄膜内部) 領域とは別に分極 (電子密度の z 方向への分布) が存在することでも説明可能であり、上述のトポロジカル相転移とも矛盾しない。

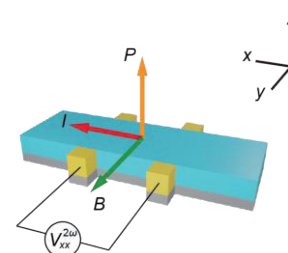


図2 非相反磁気抵抗を測定のための電流・磁場配置。

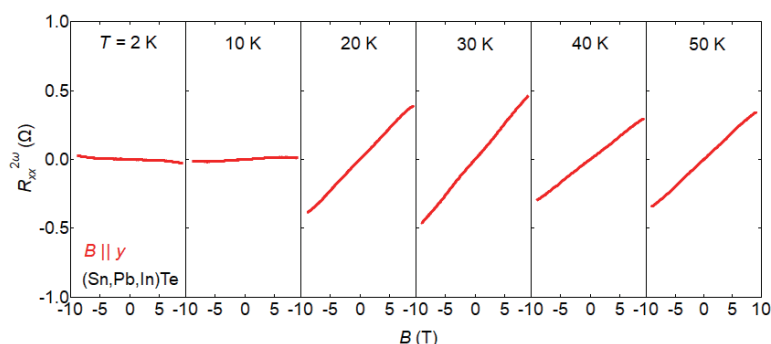


図3 各温度における非相反抵抗の磁場依存性。

3. まとめ

本研究では強誘電性とトポロジーが協奏するトポロジカル量子物質 (Sn, Pb, In)Te を対象に、対称性の変化に敏感な非相反磁気抵抗の温度変化を調べた。電気抵抗の大きな温度依存性と相関した非相反磁気抵抗を観測し、トポロジカル相転移に由来する表面状態の出現と矛盾しない結果を得た。今後電場印加による強誘電制御などと組み合わせることで革新的なエネルギー変換素子の基礎原理開発を目指す。

4. 謝辞

本研究は、公益財団法人豊田理化学研究所 豊田理研スカラー助成によりご支援いただきました。心より感謝申し上げます。

REFERENCES

- 1) T. H. Hsieh, *et al.*, *Nat. Commun.*, **3** (2012) 982.
- 2) R. Yoshimi, *et al.*, *Phys. Rev. Mater.*, **5** (2021) 094202.
- 3) Y. Okamura, *et al.*, *npj Quantum Mater.*, **7** (2022) 91.
- 4) R. Yoshimi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **134** (2025) 176602.